

2つの帯水層より揚水する場合の 地下水の非定常流動について (第3報)[†]

——漏水のある被圧—被圧系2層帯水層システムにおける異水頭の場合——

市川 勉*・星田義治**

Transient Ground Water Flow in Pumping from Two-Aquifers (Ⅲ)

——In the case of the Differential Heads at the Recharging Boundary
in Confined-Confined Aquifer System Considering Leakage——

by

Tsutomu ICHIKAWA and Yoshiharu HOSHIDA

(Received on Aug. 17, 1985)

Abstract

The authors have been published a numerical method for analyzing the transient flow of ground water by pumping up from a fully penetrating well in a multi-aquifer. In the previous paper, the numerical solution in the case of the transient ground water flow by pumping up from a well in an unconfined-confined aquifer systems considering leakage through an intermediate layer with low permeability has been reported.

In this paper, the numerical solution for transient flow of ground water by pumping up from a well in a confined-confined aquifer systems considering leakage is reported. The experimental examinations are made for application of this numerical method.

From the results, close agreement between the piezometric head distribution by observation and by calculation are obtained. The aquifer constants in each aquifer and the permeability in the intermediate layer can be estimated by applying the calculated values to experimental values. Moreover the discharge from individual aquifers into a well and the leakage rate through an intermediate layer with low permeability are well calculated respectively.

1. まえがき

前報までで、2層帯水層システムにおける涵養側の水位、水頭が等しい場合¹⁾、および、上部の帯水層が不圧

帯水層で、下部の帯水層が被圧帯水層である不圧—被圧系2層帯水層システムで、涵養側の水位、水頭が異なる場合²⁾について、解析式を導き、数値計算を行ない、室内砂箱モデル実験によって得られたデータを解析した。

[†] 第1報は、1979, No. 2で、第2報は、Vol. 25, No. 1でそれぞれ発表済みである。

* 工学部福岡教養部土木工学科講師 ** 九州東海大学工学部土木工学科教授

本論文においては、特に、上下両帯水層が被圧帯水層である被圧一被圧系2層帯水層システムにおいて、涵養側の水頭が上下両帯水層で異なる場合について、解析式を導き、室内砂箱モデル実験で得られたデータを数値計算によって解析したので、その結果を報告するものである。

2. 理論

以下に述べる理論において，次の仮定が成り立つものとする．

- i) 2つの帯水層は、ともに水平で、均質等方である。
- ii) 井戸は、下部の被圧帯水層底面まで完全に貫入している。
- iii) 各帯水層内の地下水の流れは、Darcy の法則が成立する。
- iv) 井戸枠のストレーナは、各帯水層の部分に開孔されており、この開孔の割合は、一様である。
- v) 漏水は、中間の難透水層を通して行なわれ、鉛直方向のみに発生する。
- vi) 片側揚水、片側注入となる場合、注入は、揚水理論で、 $Q = -Q$ とした場合と同じものとする。ここに、 Q は、揚水量である。
- vii) 井戸内の水位は、上部の被圧帯水層上面以下には下らないものとする。
- viii) 井戸枠の抵抗係数は、上下両帯水層で、揚水の場合も注入の場合も同じとする。

(以下に述べる記号の説明については、付録を参照のこと。)

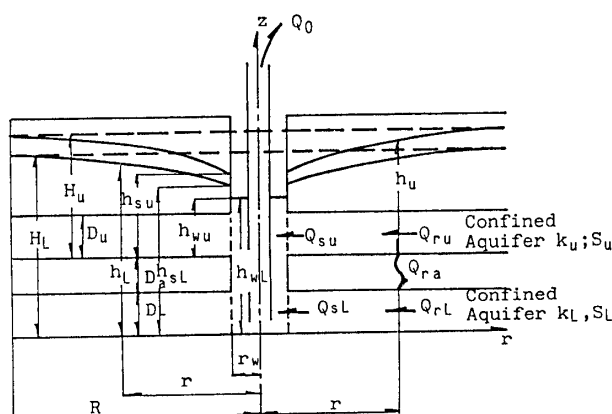


Fig. 2.1 Confined-Confining Aquifer System.

帯水層および各部の諸元を Fig. 2.1 のように定める。これらの記号を用いると、おのおの方程式は、以下のようになる。

2.1 井戸に関する連続の式

揚水開始後，井戸内の水位は，一定揚水量 Q_0 と上下

両帯水層からの浸み出し量 Q_i の差によって変化するので、井戸の断面積を A_w 、揚水管の断面積を A_p とすれば、以下ようになる。

$$(A_w - A_p) \frac{\partial h_{wL}}{\partial t} = Q_s - Q_0 \quad (2.1)$$

ここに、

$$Q_s = Q_{su} + Q_{sL} \quad (2.2)$$

である。

2.2 井戸枠の抵抗を考慮した運動方程式

この運動方程式は、井戸枠を通して井戸へ浸み出す流量を表わす式であり、涵養側水頭に差があるため、揚水開始後しばらくは、片側揚水、片側注入となる場合があるので、以下のように区別して式を誘導した³⁾。

上部被圧帯水層よりの浸み出し量

井戸へ浸み出すとき

$$Q_{su} = 2\pi r_w K D_u (h_{su} - h_{wu})^{1/2} \quad (h_{su} > h_{wu}) \quad (2.3)$$

井戸から帯水層へ注入するとき

$$Q_{su} = -2\pi r_w K D_u (h_{wu} - h_{su})^{1/2} \quad (h_{su} < h_{wu}) \quad (2.4)$$

下部被圧帯水層よりの浸み出し量

井戸へ汲み出すとき

$$Q_{sL} = 2\pi r_m K D_L (h_{sL} - h_{wL})^{1/2} (h_{sL} > h_{wL}) \quad (2.5)$$

井戸から帯水層へ注入するとき

$$Q_{sL} = -2\pi r_w K D_L (h_{wL} - h_{sL})^{1/2} \quad (h_{sL} < h_{wL}) \quad (2.6)$$

式 (2.2) に式 (2.3) から (2.6) を代入すると,

片側揚水、片側注入になるときは、

$$Q_s = 2\pi r_w K \{-D_u(h_{wu} - h_{su})^{1/2} + D_L(h_{sL} - h_{wL})^{1/2}\} \quad (2.7)$$

$$Q_s = 2\pi r_w K \{D_u(h_{su} - h_{wu})^{1/2} - D_L(h_{wL} - h_{sL})^{1/2}\} \quad (2.8)$$

となり、

両側揚水となるときは、

$$Q_s = 2\pi r_w K \{D_u(h_{su} - h_{wu})^{1/2} + D_L(h_{sL} - h_{wL})^{1/2}\} \quad (h_{su} > h_{wu}, h_{sL} > h_{wL}) \quad (2.9)$$

となる.

2.3 帯水層内の流れの方程式

帯水層内の流れの方程式は、運動方程式と連続の式からなり、これらの方程式を導く上で、中間の難透水層を通して行なわれる漏水を考慮する必要がある。この漏水を連続の式で考慮すれば、以下のようになる。

帯水層内の流れの運動方程式

上部被压带水層

$$Q_{ru} = 2\pi r k_u h_u \frac{\partial h_u}{\partial r} \quad (2.10)$$

下部被圧帯水層

$$Q_{rL} = 2\pi r k_L h_L \frac{\partial h_L}{\partial r} \quad (2.11)$$

中間の難透水層では、漏水の方向が下向きを正とすれば、幅 dr 当りで

$$Q_{ra} = 2\pi r k_a \frac{h_u + D_L + D_a - h_L}{D_a} \quad (2.12)$$

となる。

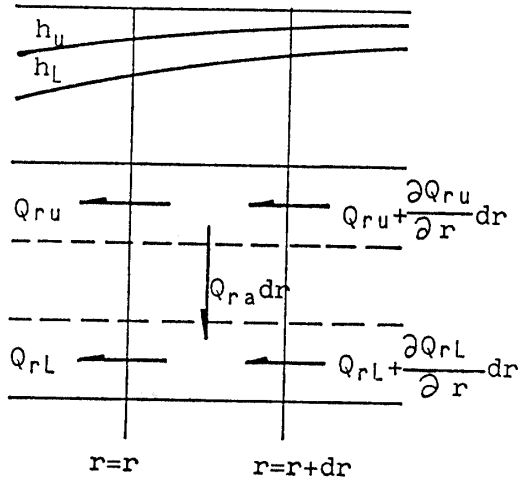


Fig. 2.2 The Equation of Continuity.

連続の方程式は、Fig. 2.2 のような関係から以下のようになる。

上部被圧帯水層

$$\frac{\partial Q_{ru}}{\partial r} 2\pi r S_u \frac{\partial h_u}{\partial t} + Q_{ra} \quad (2.13)$$

下部被圧帯水層

$$\frac{\partial Q_{rL}}{\partial r} 2\pi r S_L \frac{\partial h_L}{\partial t} - Q_{ra} \quad (2.14)$$

式 (2.10) から (2.14) より、帯水層内の流れの方程式は、以下のようになる。

上部被圧帯水層

$$\frac{\partial h_u}{\partial t} = \frac{k_u D_u}{r S_u} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h_u}{\partial r} \right) - \frac{k_a}{S_u} \frac{h_u + D_L + D_a - h_L}{D_a} \quad (2.15)$$

下部被圧帯水層

$$\frac{\partial h_L}{\partial t} = \frac{k_L D_L}{r S_L} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial h_L}{\partial r} \right) + \frac{k_a}{S_L} \frac{h_u + D_L + D_a - h_L}{D_a} \quad (2.16)$$

式 (2.15) および (2.16) に対する初期および境界条件は、以下のようになる。

$$t \leq 0 \quad ; \quad Q_0 = 0, \quad Q_{su} = -Q_{sL}$$

$$t > 0, \quad r = r_w; \quad Q_0 = \text{const.}$$

$$(A_w - A_p) \frac{\partial h_{wL}}{\partial t} = Q_s - Q_0$$

$$Q_s = Q_{su} + Q_{sL}$$

$$Q_{su} = 2\pi r_w K D_u (h_{su} - h_{wu})^{1/2} \quad (h_{su} > h_{wu})$$

$$Q_{su} = -2\pi r_w K D_u (h_{wu} - h_{su})^{1/2} \quad (h_{su} < h_{wu})$$

$$Q_{sL} = 2\pi r_w K D_L (h_{sL} - h_{wL})^{1/2} \quad (h_{sL} > h_{wL})$$

$$Q_{sL} = -2\pi r_w K D_L (h_{wL} - h_{sL})^{1/2} \quad (h_{sL} < h_{wL})$$

$$r = R; \quad h_u = H_u, \quad h_L = H_L$$

(2.17)

2.4 無次元化

式 (2.15) および (2.16) を式 (2.17) の初期および境界条件で解くわけであるが、式 (2.15), (2.16) の両式には、両帯水層の水位、 h_u , h_L が両方とも入っているため、数値計算によって解くこととする。また、数値計算をする上で、より簡単にかつ一般性を持たせるために、式 (2.1) から (2.17) を無次元化する。無次元化するために以下の各無次元量を用いることにする。

$$g_u = \frac{h_u}{H_u}, \quad g_{su} = \frac{h_{su}}{H_u}, \quad g_{wu} = \frac{h_{wu}}{H_u}, \quad g_L = \frac{h_L}{H_L}, \quad g_{sL} = \frac{h_{sL}}{H_L},$$

$$g_{wL} = \frac{h_{wL}}{H_L}, \quad x = \frac{r}{r_w}, \quad g_D = \frac{H_u}{D_L}, \quad g = \frac{H_u}{H_L},$$

$$g_{au} = \frac{D_L + D_a}{H_u}, \quad D = \frac{D_u}{D_L}, \quad k_{au} = \frac{k_a}{k_u}, \quad k_{aL} = \frac{k_a}{k_L},$$

$$A = \frac{r_w^2}{D_u D_a}, \quad B = \frac{r_w^2}{D_L D_a}, \quad Z_0 = \frac{Q_0}{2\pi k_L D_L H_L},$$

$$Z_s = \frac{Q_s}{2\pi k_L D_L H_L}, \quad Z_{su} = \frac{Q_{su}}{2\pi k_u D_u H_u}, \quad Z_{sL} = \frac{Q_{sL}}{2\pi k_L D_L H_L},$$

$$Z_L = \frac{Q_{rL}}{2\pi k_L D_L H_L}, \quad Z_u = \frac{Q_{ru}}{2\pi k_u D_u H_u}, \quad \tau_u = \frac{k_u D_u t}{S_u r_w^2},$$

$$\tau_L = \frac{k_L D_L t}{S_L r_w^2}, \quad R_m = \frac{R}{r_w}, \quad \alpha_u = \frac{r_w K}{k_u H_u^{1/2}}, \quad \alpha_L = \frac{r_w K}{k_L H_L^{1/2}},$$

$$S_L' = \frac{S_L}{1 - A_p/A_w}, \quad S_u' = \frac{S_L}{S_u}, \quad y_{0u} = \frac{1}{\sqrt{\tau_u}}, \quad y_{0L} = \frac{1}{\sqrt{\tau_L}}.$$

上記の各式を用いると式 (2.1) から (2.17) の各式は以下のようになる。

$$\frac{dg_{wL}}{d\tau_L} = 2S_L' (Z_s - Z_0) \quad (2.18)$$

$$Z_s = \frac{k_{aL} D g Z_{su} + Z_{sL}}{k_{au}} \quad (2.19)$$

$$Z_{su} = \alpha_u (g_{su} - g_{wu})^{1/2} \quad (g_{su} > g_{wu}) \quad (2.20)$$

$$Z_{su} = -\alpha_u (g_{wu} - g_{su})^{1/2} \quad (g_{su} < g_{wu}) \quad (2.21)$$

$$Z_{sL} = \alpha_L (g_{sL} - g_{wL})^{1/2} \quad (g_{sL} > g_{wL}) \quad (2.22)$$

$$Z_{sL} = -\alpha_L (g_{wL} - g_{sL})^{1/2} \quad (g_{sL} < g_{wL}) \quad (2.23)$$

$$Z_s = \alpha_L \{ -D g^{1/2} (g_{wu} - g_{su})^{1/2} + (g_{sL} - g_{wL})^{1/2} \} \quad (g_{su} < g_{wu}, \quad g_{sL} > g_{wL}) \quad (2.24)$$

$$Z_s = \alpha_L \{ D g^{1/2} (g_{su} - g_{wu})^{1/2} - (g_{wL} - g_{sL})^{1/2} \} \quad (g_{su} > g_{wu}, \quad g_{sL} < g_{wL}) \quad (2.25)$$

$$Z_s = \alpha_L \{ Dg^{1/2} (g_{su} - g_{wu})^{1/2} + (g_{sL} - g_{wL})^{1/2} \} \quad (g_{su} > g_{wu}, g_{sL} < g_{wL}) \quad (2.26)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dg_u}{dx} &= \frac{Z_u}{x} \\ \frac{dZ_u}{dx} &= -\frac{y_{0u}^2 x Z_u}{2} + x k_{au} A \left(g_u + g_{au} - \frac{g_L}{g} \right) \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{dg_L}{dx} &= \frac{Z_L}{x} \\ \frac{dZ_L}{dx} &= -\frac{y_{0L}^2 x Z_L}{2} - x k_{aL} B (g_u g + g_{ou} g - g_L) \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

$$\tau_L, \tau_u \leq 0; Z_0 = 0, Z_{su} = -\frac{k_{au}}{k_{aL}} \frac{Z_{sL}}{gD}$$

$$\tau_L, \tau_u > 0, x = 1; Z_0 = \text{const.}$$

$$\frac{dg_{wL}}{d\tau_L} = 2S_L' (Z_s - Z_0)$$

$$Z_{su} = \alpha_u (g_{su} - g_{wu})^{1/2} \quad (g_{su} > g_{wu})$$

$$Z_{su} = -\alpha_u (g_{wu} - g_{su})^{1/2} \quad (g_{su} < g_{wu})$$

$$Z_{sL} = \alpha_L (g_{sL} - g_{wL})^{1/2} \quad (g_{sL} > g_{wL})$$

$$Z_{sL} = -\alpha_L (g_{wL} - g_{sL})^{1/2} \quad (g_{sL} < g_{wL})$$

$$x = R_m; g_u = 1, g_L = 1$$

(2.29)

2.5 数値計算

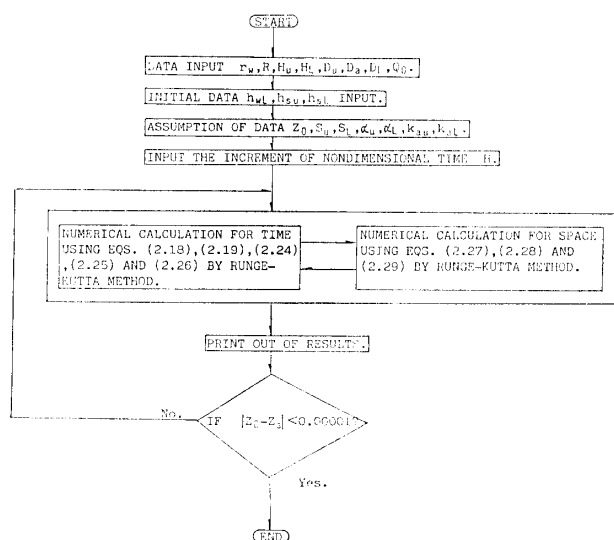


Fig. 2.3 The Flow Chart for Numerical Calculation.

数値計算の方法は、Fig. 2.3に示すように、データとして、井戸の半径 r_u 、涵養半径 R 、各帯水層の初期水位 H_u, H_L 、各帯水層の層厚 D_u, D_a, D_L 、等の帯水層の諸元を与え、次に、初期条件として、揚水前の井戸内および井戸枠の外側の水頭、 h_{wL}, h_{sL}, h_{su} を与える。そし

て、 $Z_0, \alpha_u, \alpha_L, S_u, S_L, k_{au}, k_{aL}$ の諸量を仮定して、空間方向、時間方向について Runge-Kutta法によって数値計算を行なう。この計算では、漏水量も計算する。これらの計算結果と実験による計測データが一致するまで諸量を仮定し直して計算する。

3. 実験への適用

2章で述べた理論を検討するために、砂箱モデル実験を行なった。実験水槽は、Fig. 3.1に示すように、円形を1/24にした扇形の水槽であり、給水は、上下両帯水層別個に設け、これを揚水側で同時に揚水した。

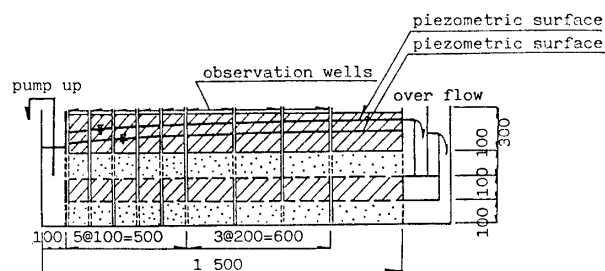


Fig. 3.1 The Outline of the Experimental Equipment.

水頭の観測は、揚水井内を除いて、上部被圧帯水層では、井戸枠の外側、井戸の中心から、30cm, 50cm, 80cm, 120cm, の各位置で、下部の被圧帯水層では、井戸の中心から、20cm, 40cm, 60cm, 100cmの各位置と井戸枠の外側に直径5mmの管に孔をあけ、外側を100メッシュのサランでつつんだ観測井を立て、装置下部にあけた穴から逆サイフォンにより、微圧変換器、容量式波高計に接続し、その水位を自動記録した。また、同時に、マノメータへも導き、水位観測した。実験に用いた試料は、上部被圧帯水層には、平均粒径0.56mm、有効径0.24mm、均等係数2.6の砂を、下部被圧帯水層には、平均粒径1.15mm、有効径0.65mm、均等係数2.1の砂を、中間の難透水層には、豊浦産標準砂を用いた。

上記のような実験データを数値計算結果と比較し、透水係数や貯留係数といった帯水層定数、各帯水層から井戸へ浸み出す流量、漏水量等の流量の関係を計算した結果を示したのが Fig. 3.2から Fig. 3.13である。これらの図のうち、Fig. 3.7と Fig. 3.13は、すでに発表している定常状態の解析結果である⁴⁾。

Fig. 3.3と Fig. 3.4, Fig. 3.8と Fig. 3.9は、井戸および帯水層内各位置における水頭の経時変化を示している。また、Fig. 3.4, Fig. 3.5, Fig. 3.6, Fig. 3.7, Fig. 3.10, Fig. 3.11, Fig. 3.12は、同様の位置における水頭の分布を示している。これらの図で、実線で示されている線は、下部被圧帯水層における水頭の計算曲線であり、破線で示されている曲線は、上部被圧帯水層に

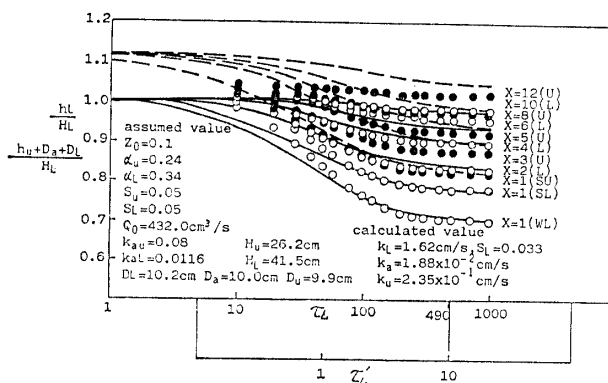


Fig. 3.2 Relation between the Elevation Heads and the Dimensionless Time in Two-Confined Aquifer.

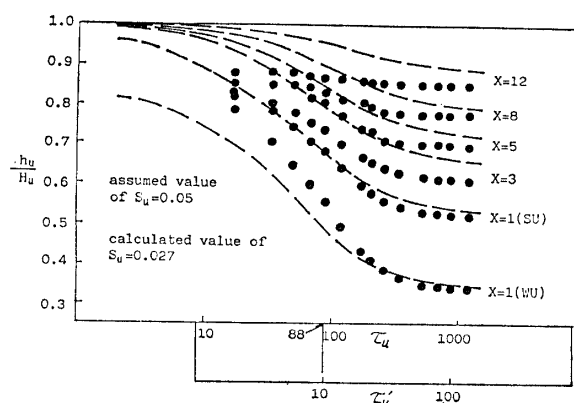


Fig. 3.3 Relation between the Elevation Heads and the Dimensionless Time in Upper-Confined Aquifer.

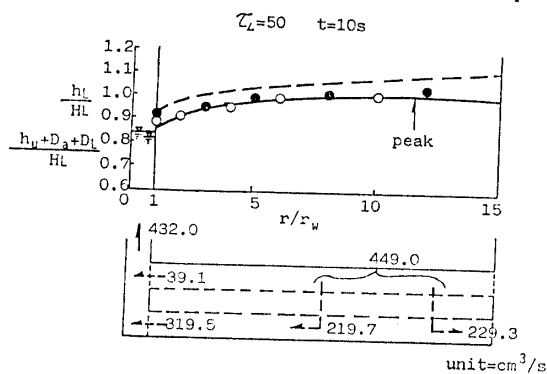


Fig. 3.4 The Head Distribution in Space Direction and the Flow Quantity at the Dimensionless Time $\tau_L = 50$.

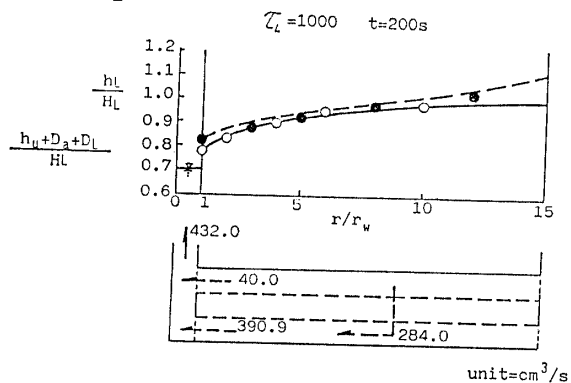


Fig. 3.5 The Head Distribution in Space Direction and the Flow Quantity at the Dimensionless Time $\tau_L = 200$.

Fig. 3.6 The Head Distribution in Space Direction and the Flow Quantity at the Dimensionless Time $\tau_L = 1000$.

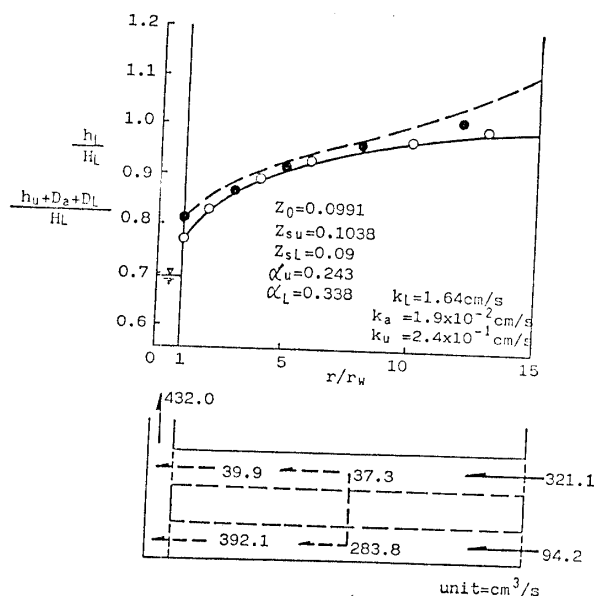
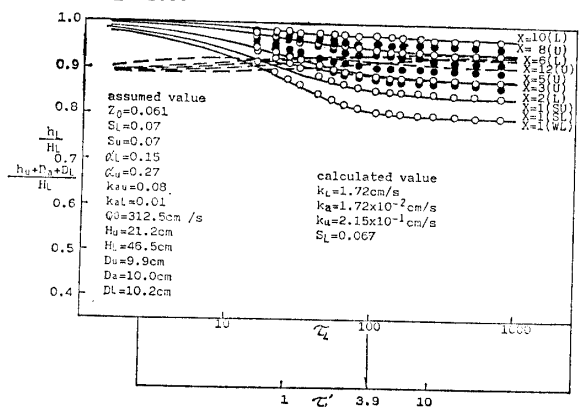


Fig. 3.8 Relation between the Elevation Heads and the Dimensionless Time in Two-Confined Aquifer.

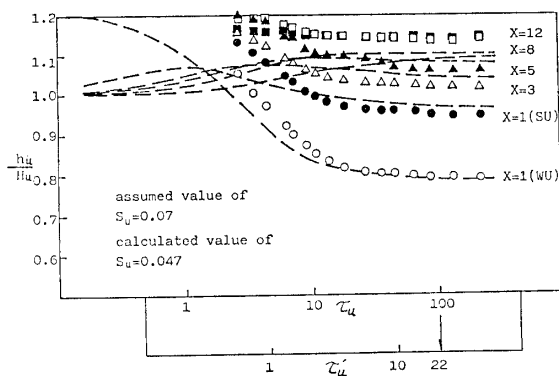


Fig. 3.9 Relation between the Elevation Heads and the Dimensionless Time in Upper-Confining Aquifer.

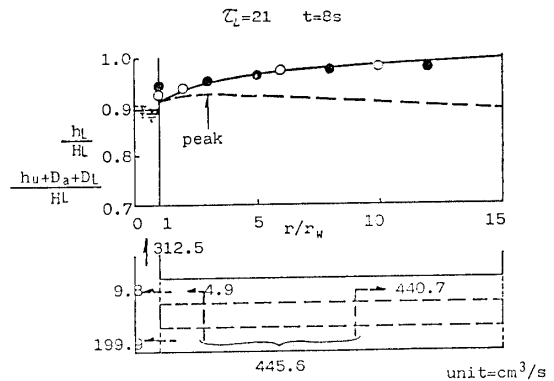


Fig. 3.10 The Head Distribution in Space Direction and the Flow Quantity at the Dimensionless Time $\tau_L=21$.

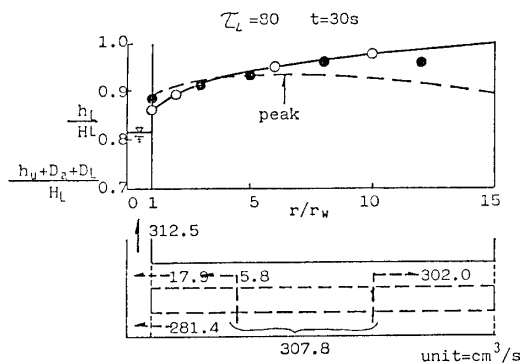


Fig. 3.11 The Head Distribution in Space Direction and the Flow Quantity at the Dimensionless Time $\tau_L=80$.

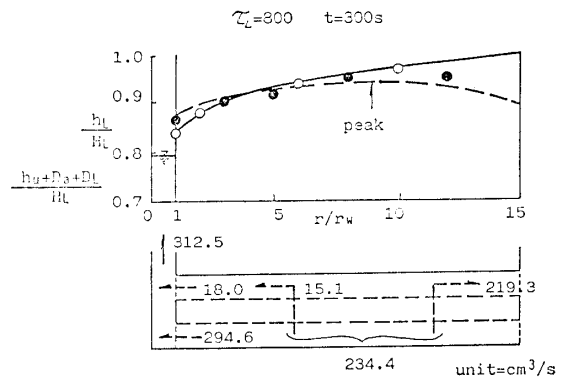


Fig. 3.12 The Head Distribution in Space Direction and the Flow Quantity at the Dimensionless Time $\tau_L=800$.

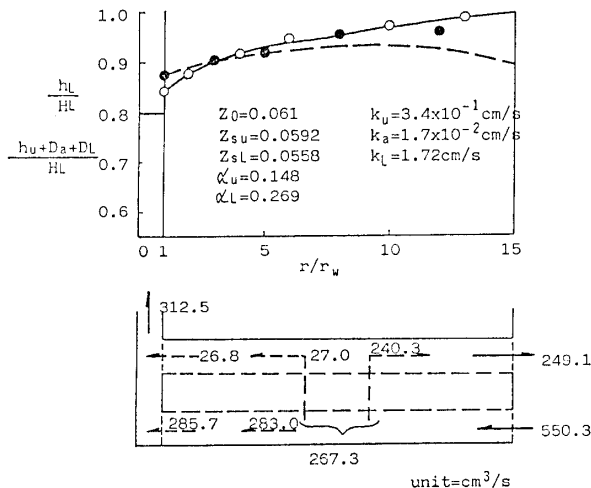


Fig. 3.13 The Head Distribution in Space Direction and the Flow Quantity at the Steady State.

における水頭の計算曲線である。ただし、井戸内の水頭の計算曲線は、Fig. 3.2とFig. 3.8では実線で、Fig. 3.3とFig. 3.9では、破線で示されている。また、これらの図中で、○印は、下部被圧帯水層内、●印は、上部被圧帯水層内の実験データであり、この場合も、井戸内の計算曲線と同様に、井戸内の観測データは、Fig. 3.2と

Fig. 3.8では、○印で、Fig. 3.3とFig. 3.9では、●印で示している。Fig. 3.9では、観測データが交差するので、各観測位置別に記号を区別している。

実験ケースは、2種類あり、上部被圧帯水層の水頭が下部被圧帯水層より高い場合と下部被圧帯水層の水頭が上部被圧帯水層より高い場合であり、前者の場合は、Fig. 3.2からFig. 3.7まで、後者の場合が、Fig. 3.8からFig. 3.13までである。

Fig. 3.2からFig. 3.7まで、Fig. 3.2は、上下両被圧帯水層の実験データへ数値計算の結果を適用した水頭の時間変動図であり、縦軸は、 h_L/H_L （井戸および下部被圧帯水層）、 $(h_u+D_L+D_a)/H_L$ （上部被圧帯水層）で表わされる無次元の水頭であり、横軸は、数値計算の線群に対しては、 $\tau_L \left(= \frac{k_L D_L t}{S_L r_w^2} \right)$ 、実験データ群に対しては、 $\tau_L' \left(= \frac{D_L t}{r_w^2} \right)$ で表わされる時間軸である。

Fig. 3.3は、上部被圧帯水層における水頭の時間変動の適用図である。この図で縦軸は、 h_u/H_u 、横軸は、数値計算の線群に対しては、 $\tau_u \left(= \frac{k_u D_u t}{S_u r_w^2} \right)$ 、実験データ群

に対しては、 $\tau_u' \left(= \frac{D_u t}{r_w^2} \right)$ である時間軸である。

Fig. 3.2を見ると、揚水時間が短い時は、あまり一致していないが、揚水開始後しばらくすると ($\tau=50$, $t \doteq 10$ s), 下部被圧帯水層および井戸周辺の水頭変動がよく一致してくる。Fig. 3.3では、井戸周辺では、よくあうが、帯水層内の水頭変動はあまりよく一致していない。この原因としては、数値計算のための方程式を立てるための仮定が、実際の地下水流動を十分表現しきっていない、与えたデータ (α_u , α_L , k_{au} , k_{aL} , S_u , S_L 等) が、正しい値からややずれている、実験データに誤差が含まれている等が考えられるが、水頭変動の傾向は、ほぼ再現されている。

これら2つの図から上下両帯水層および中間の難透水層の帯水層定数を計算することができる。それを示すと以下ようになる。

Fig. 3.2において、与えたデータ $Z_0=0.1$ より、下部被圧帯水層の透水係数 k_L は、

$$k_L = \frac{Q_0}{2\pi Z_0 D_L H_L} = \frac{432}{2 \times 3.14 \times 0.1 \times 10.2 \times 41.5} \\ = 1.62 \text{ cm/s.} \quad (3.1)$$

また、上部被圧帯水層および中間の難透水層の透水係数は、仮定した k_{au} , k_{aL} から、

$$k_a = k_{aL} \times k_L = 0.0116 \times 1.62 = 1.88 \times 10^{-2} \text{ cm/s,} \quad (3.2)$$

$$k_u = k_a / k_{au} = 0.0188 / 0.08 = 2.35 \times 10^{-1} \text{ cm/s.} \quad (3.3)$$

下部被圧帯水層の貯留係数 S_L は、Fig. 3.2において、オーバーラップした τ_L と τ_L' の値から以下ようになる。
 $\tau_L'=10$ のとき、 $\tau_L=490$ より、

$$S_L = k_L \frac{\tau_L'}{\tau_L} = 1.62 \times \frac{10}{49} = 0.033. \quad (3.4)$$

一方、上部被圧帯水層の貯留係数 S_u は、Fig. 3.3において、オーバーラップした τ_u と τ_u' の値から以下ようになる。

$$\tau_u'=10 \text{ のとき、} \tau_u=88 \text{ より、} \\ S_u = k_u \frac{\tau_u'}{\tau_u} = 0.235 \times \frac{10}{88} = 0.027. \quad (3.5)$$

となる。これら貯留係数は、仮定した値 ($S_u=0.05$, $S_L=0.05$) の値よりやや下回っているが、この程度の差は、やむを得ないものと思われる。

Fig. 3.4 から Fig. 3.6 は、Fig. 3.2 における各時間の両帯水層の水頭分布図と揚水量、上下両帯水層から井戸への浸み出し量、漏水量等の流量の関係を示したものであり、揚水開始後短時間の場合 ($\tau_L=50$, $t \doteq 10$ s), 中間的时间の場合 ($\tau_L=200$, $t \doteq 40$ s), 定常状態に近くなった場合 ($\tau_L=1000$, $t \doteq 200$ s) について、それぞれ描いた

ものである。Fig. 3.4を見ると、下部被圧帯水層の水頭分布はよく一致しているが、上部被圧帯水層の水頭分布は、計算値の方が実験値より高くなっている。Fig. 3.5になると、Fig. 3.4に比べ計算値と実験値が近くなってきており、Fig. 3.6では、ほぼ一致しているが、上部被圧帯水層の水頭分布は、やはり計算値の方が高い。この原因については、上述したとおりと思われる。また、下部被圧帯水層の水頭分布を見ると、上部被圧帯水層から涵養を受けているため、揚水開始後短時間 (Fig. 3.4) では、井戸半径の11.5倍付近に水頭のピークがあり、時間が経過するにつれて、徐々に涵養側へ移動し、定常状態に近い時間 (Fig. 3.6) では、ピークは消えてしまう。また、漏水量も両帯水層の水頭低下と接近のため、徐々に減少している。井戸への浸み出し量は、上部被圧帯水層では、あまり変化していないが、下部被圧帯水層では、増加している。従って、漏水を考慮すれば、井戸へ浸み出す地下水の主水源となっているのは、涵養側水頭の高い上部被圧帯水層であることがわかる。Fig. 3.7は、同じ実験ケースの定常状態を解析したものである⁴⁾。同図の水頭分布は、Fig. 3.6の水頭分布とほぼ一致している。また、流量の関係もほぼ一致している。ただし、図中の実線矢印で示した流量は、実測値である。この定常解析結果と非定常解析結果を比較すると、ほぼ一致することから、本解析法による非定常解析は、ほぼ妥当であると思われる。

Fig. 3.8 から Fig. 3.13 は、上述の実験ケースとは逆に、涵養側水頭で下部被圧帯水層の方が上部被圧帯水層より高い場合であり、Fig. 3.8 と Fig. 3.9 は、水頭の経時変化の適用図であり、Fig. 3.10 から Fig. 3.12 は、揚水開始後短い時間、中間的时间、定常状態に近い時間における水頭の空間方向の分布と揚水量、井戸への浸み出し量、漏水量等の流量を示したものである。Fig. 13は、非定常解析の状態をチェックするために行なった定常解析結果である。上下両被圧帯水層と難透水層の透水係数は、Fig. 3.8 から以下ようになる。

$$k_L = \frac{Q_0}{2\pi Z_0 D_L H_L} = \frac{315.2}{2 \times 3.14 \times 0.061 \times 10.2 \times 46.5} \\ = 1.72 \text{ cm/s} \quad (3.6)$$

上部被圧帯水層の透水係数 k_u は、仮定した透水係数の比 k_{au} と k_{aL} より

$$k_u = \frac{k_{aL} k_L}{k_{au}} = \frac{0.01}{0.08} \times 1.72 = 2.15 \times 10^{-1} \text{ cm/s} \quad (3.7)$$

難透水層の透水係数は、

$$k_a = k_{aL} \times k_L = 0.01 \times 1.72 = 1.72 \times 10^{-2} \text{ cm/s} \quad (3.8)$$

となる。一方、下部被圧帯水層の貯留係数は、数値計算結果と実験データをオーバーラップしていることにより、時間軸の比によって計算できるので、Fig. 3.8 において、

$\tau_L=100$ に対応する τ_L' は、3.9となるから、

$$S_L = \frac{\tau_L'}{\tau_L} k_L = \frac{3.9}{100} \times 1.72 = 0.067 \quad (3.9)$$

となり、上部被圧帯水層の貯留係数 S_L も、上と同様にして、Fig. 3.9から、

$$S_u = \frac{\tau_u'}{\tau_u} k_u = \frac{22}{100} \times 2.15 \times 10^{-1} = 0.047 \quad (2.10)$$

となる。貯留係数については、仮定値が $S_L=0.07$ 、 $S_u=0.07$ なのでほぼ妥当であると思われる。また、Fig. 3.8とFig. 3.9において、揚水開始後しばらくは一致しないが、その後は、計算値と実測値がほぼ一致している。そして、定常解析結果であるFig. 3.13の流量と非定常解析における定常状態に近い解析結果であるFig. 3.12の流量もほぼ近い値を示しているのでこの非定常解析もほぼ妥当なものと思われる。また、Fig. 3.9では、涵養側水頭の低い上部被圧帯水層における水頭の時間変動を示しているが、実験データでは、揚水開始直後における涵養側に近い帯水層内の水頭が漏水によって下部被圧帯水層の涵養側水頭に近い値となっているのに対し、計算値では、これよりはるかに低い上部被圧帯水層の涵養側水頭に近い値になっている。これは、計算開始時のデータとして、井戸内外の水頭しか与えていないことや、揚水と注入では、仮定vi)で、流れが逆になるものとして扱っていること等、いくつかの原因が重なって一致しないものと思われる。この問題については、今後、十分検討する必要があるものと思われる。

4. 結 言

これまで、3報にわたり、2つの帯水層から揚水する場合の地下水の非定常流動に対する数値解を砂箱モデル実験に適用し、その妥当性について検討してきた。本報においては、特に、2つの被圧帯水層から揚水する場合の地下水の非定常流動を、漏水、涵養側水頭に差がある場合について解析した。その結果、以下のことがわかった。

- 1) 漏水および涵養側に水頭差のある被圧一被圧系2層帯水層システムからの揚水による地下水の非定常流動が井戸ロスを考慮して、解析可能となった。
- 2) 本数値解を用いれば、上下両帯水層の帯水層定数、中間の難透水層の透水係数が推定できる。
- 3) 上下両帯水層から井戸へしみ出す流量、上下帯水層間の漏水量を任意の時間で推定できる。

今後は、揚水直後において発生する片側揚水、片側注入の状態の解析をより厳密におこなう必要がある。

なお、本研究は、昭和59年度文部省科学研究費の補助を受けた。

参考文献

- 1) 星田・濱野・市川・前原；“2つの帯水層より揚水する場合の地下水の非定常流動について（第1報）——同一水頭の場合”，東海大学紀要工学部，1979-2，pp. 93-102，1980。
- 2) 市川・星田；“2つの帯水層より揚水する場合の地下水の非定常流動について（第2報）——漏水のある不圧一被圧系2層帯水層システムにおける異水頭の場合”，東海大学紀要工学部，Vol. 25，No. 1，pp. 79-86，1986。
- 3) 星田・市川；“揚水における井戸ロスの評価に関する考察”，土木学会論文報告集，第313号，pp. 37-46，1981。
- 4) 星田・市川・玉井；“2つの帯水層から揚水するときの地下水の流動についての考察”，土木学会論文報告集，第331号，pp. 75-81，1983。

付 録

A_w ：揚水井の断面積 [L^2]

A_p ：揚水管の断面積 [L^2]

Q_0 ：揚水量 [L^3T^{-1}]

Q_s ：上下両帯水層から井戸へしみ出す全しみ出し量 [L^3T^{-1}]

Q_{su} ：上部被圧帯水層から井戸へしみ出すしみ出し量 [L^3T^{-1}]

Q_{sL} ：下部被圧帯水層から井戸へしみ出すしみ出し量 [L^3T^{-1}]

r_w ：井戸の半径 [L]

R ：井戸の中心から涵養境界までの距離 [L]

r ：井戸の中心からの距離 [L]

K ： $\sqrt{\frac{2g}{\sum f}}$ で表わされる井戸枠の抵抗係数。ここに、 g は重力加速度で、 $\sum f$ は井戸枠の全抵抗。 [$L^{1/2}T^{-1}$]

D_L ：下部の被圧帯水層の層厚 [L]

D_a ：中間の難透水層の層厚 [L]

D_u ：上部の被圧帯水層の層厚 [L]

H_u ：上部の被圧帯水層における涵養側水頭 [L]

H_L ：下部の被圧帯水層における涵養側水頭 [L]

k_u ：上部の被圧帯水層の透水係数 [LT^{-1}]

k_L ：下部の被圧帯水層の透水係数 [LT^{-1}]

k_a ：中間の難透水層の透水係数 [LT^{-1}]

S_u ：上部の被圧帯水層の貯留係数（無次元）

S_L ：下部の被圧帯水層の貯留係数（無次元）

t ：揚水開始後の時間 [T]

h_{wu} ：上部の被圧帯水層における井戸内の水頭 [L]

h_{uL} ：下部の被圧帯水層における井戸内の水頭 [L]

h_{su} ：上部の被圧帯水層における井戸枠の外側の水頭 [L]

h_{sL} ：下部の被圧帯水層における井戸枠の外側の水頭 [L]

h_u : 井戸の中心から r の距離における上部の被圧帯水層の水頭 [L]

h_L : 井戸の中心から r の距離における下部の被圧帯水層の水頭 [L]

Q_{ru} : 井戸の中心から r の距離の円筒を通過する上部の

被圧帯水層の流量 [L^3T^{-1}]

Q_{rL} : 井戸の中心から r の距離の円筒を通過する下部の被圧帯水層の流量 [L^3T^{-1}]

Q_{ra} : 井戸の中心から r の地点において発生する幅 dr 当りの漏水量 [L^2T^{-1}]